

Eve Käsänen

SULASUOLAREAKTORIEN TOIMINTA- PERIAATE JA KEHITYS

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Yliopistonlehtori Seppo Syrjälä
Maaliskuu 2020

TIIVISTELMÄ

Eve Käsänen: Sulasuolareaktorien toimintaperiaate ja kehitys
Kandidaatintyö, 24 sivua
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma
Maaliskuu 2020

Tämä kandidaatintyö on kirjallisuusselvitys sulasuolareaktoreihin, niiden toimintaperiaatteen ja niiden parissa tehtyyn kehitystyöhön 1940-luvulta nykyhetkeen. Sulasuolareaktori on neljännen sukupolven reaktorityyppi, joka käyttää nestemäisessä muodossa olevaa suolasulaseosta joko polttoaineenaan primääripiirissä tai jäähdytinaineena sekundääripiirissä tai molempia. Tässä kandidaatintyössä käsitellään sulaa polttoainetta hyödyntäviä sulasuolareaktoreita. Polttoainesuolaan on voitu liuottaa joko fissiiliä tai sekä fissiiliä että fertiiliä ainetta. Polttoainesuola kiertää laitoksen primääripiirissä sydämen läpi, missä tapahtuu fissio. Fission seurauksena polttoainesuola lämpenee ja syntynyt lämpö siirretään suolasulasta lämmönvaihtimien avulla sekundääripiiriin. Sekundääripiiristä lämpö siirretään edelleen tertiääripiiriin, jossa siitä generoidaan sähköä.

Työ on koottu käyttäen lähteinä kansainvälisiä tutkimusartikkeleita, ydinenergian kirjallisuutta, kirjallisuusselvityksiä ja kansainvälisten järjestöjen tutkimuskoosteita. Tutkimusta aiheesta löytyy runsaasti sekä 1900-luvun projekteista että tuoreemmista 2000-luvulla suoritetuista kokeista ja tutkimuksista. Sulasuolareaktorien tutkimusta tehdään paljon Venäjällä ja Kiinassa.

Sulasuolareaktorien parissa tehty tutkimustyö alkoi 1940-luvulla lentokonereaktorikoe AREn parissa. ARE oli menestyksenkäs ja siitä saatiin paljon hyödyllistä tietoa sulasuolareaktoreista. ARE:een jälkeen ORNL:ssa aloitettiin sulasuolareaktorikoe. MSRE alkoi 1960-luvun taitteessa ja kokeen puitteissa rakennettiin 8 MW reaktori, joka osoitti, että hyödyntämällä sulasuolapolttoainetta on mahdollista tuottaa sähköä. MSRE:n jälkeen tutkittiin lyhyesti hyötöreaktoria, mutta rahoituksen loputtua ORNL:n tutkimukset sulasuolareaktoreihin päättyivät 1980-luvulla.

Uusi kiinnostus MSR-konseptia kohtaan heräsi 2000-luvun alussa, kun GIF nimesi MSR:n yhdeksi neljännen sukupolven ydinreaktorikonseptiksi. Tutkimustyö elpyi ja lukuisia erilaisia sulasuolateknologiaa hyödyntäviä reaktoreita on kehitelty viimeisen 20 vuoden aikana. Useita tutkimushaasteita, joita sulasuolan käyttö aiheuttaa on tutkittu syvällisesti, mutta niiden implementointi teolliselle mittakaavalle on yhä tekemättä. Tutkimukset ovat edistyneet valtavasti, mutta työnsarkaa on vielä paljon jäljellä.

Sulasuolareaktoreilla on useita ainutlaatuisia turvallisuusominaisuuksia. Verrattaessa MSR:ien turvallisuutta kevytvesireaktoreihin, voidaan todeta polttoaineen nestemäisen olomuodon olevan turvallisempaa hyödyntää kuin kiinteä polttoaine. Sulasuolareaktorien joustava polttoainekierto myös mahdollistaa toriumpolttoaineen käytön ja sen myötä tehokkaamman proliferaation vastustamisen, kuin uraanipolttoainetta hyödynnettäessä.

Avainsanat: sulasuolareaktori, toimintaperiaate, turvallisuus, kehitys, sula polttoaine, torium

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
2. SULASUOLAREAKTORIEN TOIMINTAPERIAATE	2
3. SULASUOLAREAKTORIEN KEHITYS	6
3.1 Sulasuolareaktorikoe MSRE	6
3.2 MSR-konseptin valinta neljännen sukupolven reaktorityypiksi.....	8
3.3 Tutkimuksen edistyminen 2000-luvun alusta vuoteen 2015	9
3.4 Tutkimuksen nykytila ja tulevaisuuden haasteet	12
4. SULASUOLAREAKTORIEN TURVALLISUUDEDUT VERRATTUNA KEVYTVESI- REAKTOREIHIN	16
4.1 Laitostekninen turvallisuus	16
4.2 Proliferaatio ja ydinjäte	17
4.3 Kuljetus	18
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	20
LÄHTEET	22

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ARE	engl. Aircraft Reactor Experiment, lentokonereaktorikoe
Euratom	engl. European Atomic Energy Community, Euroopan atomienergiayhteisö
EVOL	engl. Evaluation and Viability of Liquid Fuel Fast Reactor System, nopeita neutroneita hyödyntävän nestemäisen polttoaineen reaktortyyppien toteuttamiskelpoisuutta arvioiva projekti
FHR	engl. Fluoride-Salt-Cooled High-Temperature Reactor, fluoridisuolajäähdytteinen korkean lämpötilan reaktori
GIF	engl. Generation IV International Forum, kansainvälinen yhteistointimintaelin
LWR	engl. Light Water Reactor, kevytvesireaktori
MARS	engl. Minor Actinide Recycling in molten Salt, venäläinen tutkimusprojekti sivutuotteina syntyneiden aktinoidien uudelleenkäyttöön sulasuolassa
MOSART	engl. Molten Salt Actinide Recycler & Transmuter, aktinoideja polttava sulasuolareaktori
MSBR	engl. Molten Salt Breeder Reactor, sulasuolahyötöreaktori
MSFR	engl. Molten Salt Fast Reactor, nopea sulasuolareaktori
MSR	engl. Molten Salt Reactor, sulasuolareaktori
MSRE	engl. Molten Salt Reactor Experiment, sulasuolareaktorikoe
ORNL	engl. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridgen kansallislaboratorio
PSCC	engl. Power System Computation Conference, sähkövoimajärjestelmien laskentakonferenssi
TMSR	engl. Thorium Molten Salt Reactor nuclear energy system, torium-polttoaineella toimiva sulasuolareaktorisysteemi

1. JOHDANTO

Sulasuolareaktori (engl. Molten Salt Reactor, MSR) on neljännen sukupolven ydinreaktorityyppien kokoelma, joiden ominaisuuksia tutkitaan jatkuvasti. Lähes kaikkia sulasuolareaktortyypppejä yhdistää nestemäinen polttoaine ja sen tuomat ainutlaatuiset mahdollisuudet. Sulasuolareaktoreihin luetaan myös kiinteää polttoainetta hyödyntävät reaktorit, joissa jäähdytteenä käytetään sulasuolaseosta. Sulasuolareaktori ei ole uusi idea, vaan konseptia on kehitetty ja tutkittu jo 1940-luvulta alkaen. Aikaisia merkittäviä tutkimusprojekteja olivat muun muassa Yhdysvalloissa suoritettut lentokonereaktorikoe ARE (engl. Aircraft Engine Experiment) ja sulasuolareaktorikoe MSRE (engl. Molten Salt Reactor Experiment). Tutkimukset kuitenkin päättyivät rahoituksen loppuessa ja sulasuolareaktorien kehitys jäi taka-alalle. [1]

Uusi kiinnostus sulasuolareaktoreita kohtaan heräsi vuosituhaten vaihteessa niiden turvallisuuden, hyvän neutronitalouden, kyvyn hyödyntää torium-uraani polttoainetta ja kyvyn polttaa transuraanista jätettä (engl. transuranic waste, TRU) vuoksi [1]. Lisäksi kansainvälinen yhteistyöelin Generation IV International Forum (GIF) nimesi sulasuolareaktorin yhdeksi kuudesta neljännen sukupolven reaktorityypiksi. Sulasuolareaktorikonsepti on siis yksi potentiaalisista vaihtoehtoista, joilla on mahdollisuus tulevaisuudessa tuottaa hiilidioksidivapaampaa energiaa ja ehkäistä näin ilmastonmuutoksen etenemistä.

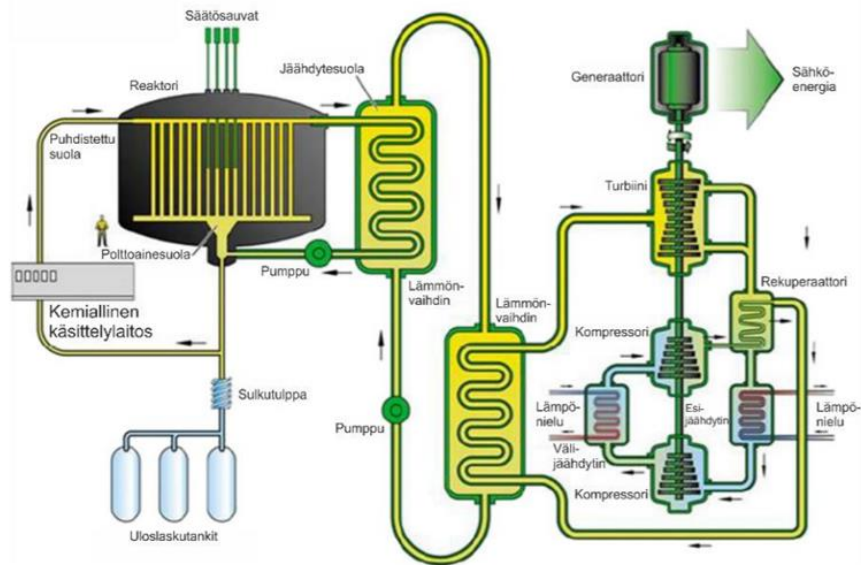
Tämä kandidaatintyö on kirjallisuuskatsaus sulasuolareaktoreista. Työssä kuvataan sulasuolareaktoreiden toimintaperiaate ja kuvaus tapahtuneesta kehityksestä 1940-luvulta 2010-luvun loppupäähän asti. Työssä keskitytään nestemäistä polttoainetta hyödyntäviin konsepteihin. Sulasuolareaktoreihin ja konseptin kehitystyöhön liittyvää kirjallisuutta ja tieteellisiä artikkeleita löytyy runsaasti, vaikka kaupallista konseptia ei vielä ole käytössä.

Kandidaatintyössä käydään läpi sulasuolareaktorien yleinen toimintaperiaate luvussa 2. Luvussa 3 käydään läpi sulasuolareaktorien historiaa, konseptin kehitystä, sen parissa tehtyä tutkimustyötä 2000-luvulla ja tulevaisuuden tutkimusteemoja sulasuolareaktorien kannalta. Luvussa 4 tarkastellaan sulasuolareaktorien turvallisuusetuja verrattuna kevytvesireaktoreihin (engl. Light Water Reactor, LWR). Työn lopussa luvussa 5 on esitetty lyhyesti työstä tehdyt johtopäätökset.

2. SULASUOLAREAKTORIEN TOIMINTAPERIAATE

Sulasuolareaktori (engl. Molten Salt Reactor, MSR) on ydinvoimalareaktorityyppi, joka poikkeaa kaupallisessa käytössä olevista ydinvoimalareaktorityypeistä merkittävästi polttoaineen osalta. Sähköntuotantoon käytössä olevissa ydinreaktorityypeissä ydinpolttoaine on kiinteässä muodossa polttoainesauvoissa, mutta sulasuolareaktoreissa polttoaine on liuotettu kuljetinsuoloista ja polttoainesuoloista muodostuvaksi sulasuolaseokseksi. Yhden suolan konseptissa sekä fissiili että fertiili materiaali on liuotettu samaan suolaan, kahden suolan konseptissa fissiili ja fertiili materiaali ovat liuotettuina omiin suoloihinsa. [2]

Sulasuolareaktoreista puhuttaessa ei puhuta ainoastaan yhdestä reaktorityypistä, vaan kattotermistä usealle erilaiselle reaktorikonseptille, jotka voivat erota teknologioiltaan merkittävästi. Yhdistävänä tekijänä termin alle kuuluville konsepteille on sulasuolaseoksen hyödyntäminen joko polttoaineena, jäähdytinaineena tai molemmissa. Yksinkertainen toimintaperiaate sulaa polttoainetta hyödyntävälle sulasuolareaktorille on esitetty kuvassa 1. Sulasuolaseos kiertää jatkuvasti voimalaitoksen primääripiirissä. Seos ohjataan reaktorin sydämen läpi, jolloin polttoainesuolassa tapahtuu fissiota. Fissiosta vapautuva lämpö varastoituu suolaan ja jatkaa virtausta piirissä eteenpäin kohti lämmönvaihdinta. Suolan kulkiessa lämmönvaihtimen läpi se luovuttaa lämpöenergiaansa sekundääripiiriin ja siellä virtaavaan kuljetinsuolaan. Lämmön luovutuksen jälkeen osa primääripiirissä kiertävästä polttoainesuolasta ohjataan kemialliseen käsittelyyn jälleenkäsittelylaitokselle. Jälleenkäsittelylaitoksella suolasta poistetaan fissiotuotteita ja seokseen lisätään uutta fissiiliä materiaalia. Se osa suolasta, joka ei virtaa jälleenkäsittelylaitokselle, virtaa takaisin reaktoriin polttoainesuolaksi ilman puhdistusta. Suolan jatkuva käsittely mahdollistaa sulasuolareaktorikonseptin mukaisen laitoksen toiminnan ilman polttoaineseisakkeja. [3]



Kuva 1 Sulasuolareaktorin periaatekaavio [muokattu lähteestä 2]

Sekundääripiirissä kiertävä jäähdytinsuola luovuttaa primääripiiristä saadun energian toisen lämmönvaihtimen avulla tertiääripiiriin. Sulasuolan lämpötila reaktorissa on korkea, noin 500 K, joten myös siirtyvä lämpöenergia on suuri. Tästä syystä sähkön tuotantoon voidaan käyttää tertiääripiirissä joko höyry- tai kaasuturbiinia. [1]

Yleisesti ydinvoimareaktorit voivat kuulua joko termiseen tai nopeaan reaktoriluokkaan. Termisessä reaktoriluokassa fissiota aiheuttavia neutroneita on esihidastettu moderaattorin avulla tasolle, jossa niiden terminen energia vastaa keskimäärin väliaineen atomien lämpöliikkeen energiaa. Tällöin niin kutsutuilla hitailla neutroneilla on suurempi todennäköisyys aiheuttaa fissio kuin nopeilla neutroneilla. Nopeaan reaktoriluokkaan kuuluvat reaktorit puolestaan hyödyntävät nopeita, korkeaenergisiä neutroneita fission aikaansaamiseen. Tällöin neutroneita ei tarvitse hidastaa ja moderaattoria ei tarvita, vaan fission tapahtumisen todennäköisyyttä lisätään kasvattamalla fissiilin isotoopin määrää polttoaineessa. Sulasuolareaktorit voivat olla joko termisiä tai nopeita reaktoreja. [4]

Sulasuolareaktori on polttoainekierroltaan hyvin joustava [1-3]. Polttoaineena voidaan hyödyntää sulasuolaseosta, johon on liuotettu fissiiliä materiaalia, seosta, jossa on sekä fissiiliä että fertiiliä materiaalia tai sulasuolareaktoria voi käyttää transuraanisen jätteen polttamiseen [1,2]. Fissiilillä materiaalilla tarkoitetaan halkeamiskelpoista materiaalia, jossa voi tapahtua fissioreaktio hitaan, eli termisen neutronin törmäyksen vaikutuksesta. Ydinreaktorikäyttöön sopivia fissiilejä aineita ovat luonnossa esiintyvä uraanin 235 isotooppi ^{235}U (0,72% luonnonuraanista) ja keinotekoiset ^{233}U ja ^{239}Pu . Fertiili materiaali puolestaan tarkoittaa ytimiä, joista saadaan neutronikaappauksen myötä fissiilejä ytimiä.

Fertiilejä ytimiä kutsutaan myös hyötökelpoisiksi, sillä niiden avulla voidaan päästä tilanteeseen, jossa ketjureaktiossa syntyy enemmän fissiiliä materiaalia kuin sitä kuluu. Tärkeimpiä fertiilejä isotooppeja ovat ^{238}U ja ^{232}Th . [4]

Joustavan polttoainekiertoensa vuoksi MSR-konsepti mahdollistaa teoriassa ydinpolttoainekierron sulkemisen sekä vähentää tarvetta uraanin rikastusprosessille ja ylipäättään riippuvuutta rajallisesta uraanista [1,2]. Toriumia esiintyy maaperässä, ja se on kolme kertaa yleisempää kuin uraani [4]. Taulukossa 1 on esitetty toriumresurssien arvioitu määrä maailmassa [5]. Taulukossa 2 puolestaan on esitetty 16 merkittävimmän uraanintuottajan osuudet prosentteina todennetuista reserveista [6]. Taulukosta ja kuvasta huomaamme selkeästi, kuinka toriumresurssit ovat jakautuneet uraania tasaisemmin maiden välille.

Taulukko 1. *Toriumresurssien arvioitu määrä maailmassa [muokattu lähteestä 5]*

Maa	Toriumin määrä (t)	Osuus toriumresursseista (%)
Intia	846 000	13.31
Brasilia	632 000	9.94
Australia	595 000	9.36
USA	595 000	9.36
Egypti	380 000	5.98
Turkki	374 000	5.89
Venezuela	300 000	4.72
Kanada	172 000	2.71
Venäjä	155 000	2.44
Etelä-Afrikka	148 000	2.33
Kiina	100 000	1.57
Norja	87 000	1.37
Grönlanti	86 000	1.35
Suomi	60 000	0.94
Ruotsi	50 000	0.79
Kazakstan	50 000	0.79
Muut maat	1 725 000	27.15
Yhteensä	6 355 000	100

Taulukko 2. *Uraanin todennetut reservit ja resurssit maailmassa [muokattu lähteestä 6]*

Maa	Uraanin määrä (t)	Osuus uraani- resursseista (%)
Australia	1 818 300	30
Kazakstan	842 200	14
Kanada	514 400	8
Venäjä	485 600	8
Namibia	442 100	7
Etelä-Afrikka	322 400	5
Kiina	290 400	5
Nigeria	280 000	5
Brasilia	276 800	2
Uzbekistan	139 200	2
Ukraina	114 100	2
Mongolia	113 500	2
Botswana	73 500	1
Tansania	58 200	1
USA	47 200	1
Jordania	43 500	1
Muut maat	280 600	4
Yhteensä	6 142 600	100

Sulasuolareaktorien käyttöön suunnitellut suolaseokset ovat useimmiten fluoridien seoksia, sillä fluoridit kestävät hyvin säteilytystä ja niiden termodynaamiset ja reaktorifysikaaliset ominaisuudet ovat tarkoitukseen sopivia. Tutkittuja suolojen koostumuksia ovat esimerkiksi LiF-ThF₄-UF₄ (77.5-20-2.5 mol%), LiF-BeF₂ (73-27 mol%), LiF-NaF-BeF₂ (15-58-27 mol%) ja LiF-NaF-KF (38-9-46 mol%). [7]

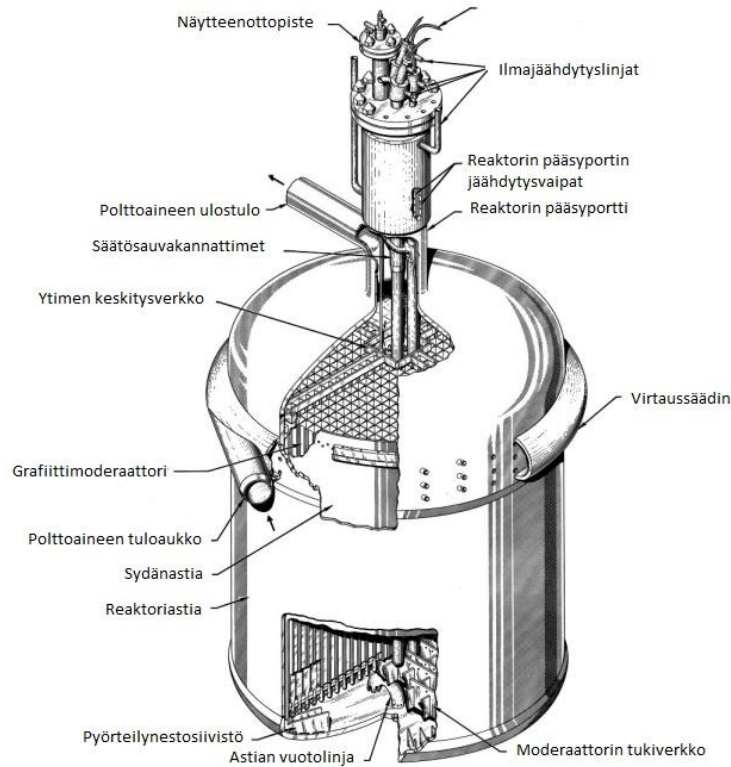
3. SULASUOLAREAKTORIEN KEHITYS

Sulasuolareaktorien kehitys- ja tutkimustyö juontaa juurensa jopa 1940-luvun loppupuoleen. Tuolloin Yhdysvalloissa aloitettiin Oak Ridgen kansallislaboratoriossa (engl. Oak Ridge National Laboratory, ORNL) lentokonereaktorikoe ARE (engl. Aircraft Engine Experiment). Tutkimuksen tarkoituksena oli kehittää lentokoneen voimanlähteeksi sopiva ydinreaktori. Tutkimus oli menestyksekkästä, ja sen pohjalta saatiin paljon hyödyllistä tietoa sulasuolareaktoreiden suolojen ominaisuuksista ja niiden kanssa yhteensopivista materiaaleista. Tutkimus myös osoitti sulasuolareaktorikonseptin olevan sopiva kaupalliseen sähköntuotantoon. [2, 8]

3.1 Sulasuolareaktorikoe MSRE

Lentokonereaktorikokeen päätyttyä sulasuolareaktoreihin liittyvän tutkimuksen pääsuuntia muutettiin hieman ja tutkimus alkoi keskittyä enemmän toriumkierrolla toimiviin hyötöreaktoreihin. Osasyyn tähän tutkimussuunnan muutokseen oli usko ydinvoiman eksponentiaaliseen lisääntymiseen ja rajallisten uraaniresurssien riittämättömyyteen [2]. Tehtyjen tutkimusten perusteella ORNL haki rahoitusta ja lupaa vuonna 1959 koereaktorin rakentamiseen. Lupa myönnettiin ja suunnitteluvaiheen jälkeen vuonna 1962 aloitettiin koereaktorin rakentaminen. Tutkimus nimettiin sulasuolareaktorikokeeksi (Molten Salt Reactor Experiment, MSRE). [8]

MSRE-hankkeessa rakennettiin 8 MW:n reaktori. Hankkeessa rakennettu reaktori on ensimmäinen ja ainoa hyvin karakterisoitu sulasuolareaktori, joten sitä käytetään vieläkin lähtökohtana sulasuolareaktorien tutkimuksissa [9-11]. Kokeessa rakennetun reaktorin toimintaperiaate on luvussa 2 ja kuvassa 1 esitetyn kaltainen. Luonnos MSRE-reaktorista on esitetty kuvassa 2. Tarkka kuvaus sulasuolareaktorikokeessa rakennetusta reaktorista löytyy muun muassa Rosenthalin kirjoittamasta ORNL:n tutkimusreaktoreista kertovasta artikkelista [8]. Polttoainesuolana koereaktorissa käytettiin litiumin, berylliumin, zirkoniumin ja uraanin fluoridien seosta (65-29-5-1 mol%). Polttoaineen fissiilinä materiaalina testattiin kolmea eri ainetta, uraanin isotooppeja ^{233}U ja ^{235}U ja plutoniumin isotooppia ^{239}Pu . Koereaktori oli maailmassa ensimmäinen, joka hyödynsi polttoainettaan uraanin isotooppia ^{233}U . Polttoainesuola ei sisältänyt toriumia, mutta sen hyödyntäminen hyötöreaktorissa oli myöhemmin tutkimuskohteena MSBR-konseptia (engl. Molten Salt Breeder Reactor) tutkittaessa. [8, 10]



Kuva 2 Luonnos MSRE-reaktorista [muokattu lähteestä 8]

MSRE-hankkeessa rakennettu reaktori suunniteltiin termiseksi reaktoriksi. Neutronien hidastamisessa oikealle energiatasolle käytettiin grafiittimoderoitua reaktorisydäntä. Grafiitin kanssa ilmeni kuitenkin ongelmia, esimerkiksi sen eliniän suhteen. Oli odotettavissa, että reaktorin grafiittisydän jouduttaisiin vaihtamaan säteilyn aiheuttaman kulumisen vuoksi reaktorin eliniän aikana [3]. Grafiittisydämen monimutkaisuus voisi myös aiheuttaa sen, että pienenkin vian tai halkeaman muodostuminen yhteen sen osaan, johtaisi siihen, että koko sydän jouduttaisiin vaihtamaan [2]. Grafiittimoderoidussa reaktorissa ongelmia aiheutti myös positiiviset lämpökytkentäkertoimet, joita ilmeni varsinkin silloin, kun grafiitin lämpölaajenemista ei huomioitu riittävästi [1]. Nykypäivänä tutkimusten painopiste on siirtynyt termisen neutronispektrin grafiittimoderoiduista reaktoreista nopean neutronispektrin konsepteihin. [11, 12]

Toinen sulasuolareaktorikokeessa ilmennyt haaste oli suolan kanssa tekemisissä olevien materiaalien kuluminen. Kaikki metalliosat, jotka olivat kosketuksissa suolaan, valmistettiin nikkelipohjaisesta metalliseoksesta, joka myöhemmin nimettiin Hastelloy-N:ksi. Seos toimi hyvin yhdessä jäähdytinsuolan ($2\text{LiF}-\text{BeF}_2$ -seos) kanssa, mutta ollessaan kosketuksissa polttoainesuolaseoksen kanssa ilmeni nikkeliseoksessa säteilyvaurioita ja raerajamurtumia. [8, 10] Korroosion aiheuttajaksi tunnistettiin polttoainesuolassa syntyvä telluurin fissiotuote, mutta muokkaamalla nikkeliseoksen koostumusta esille tulleista ongelmista päästiin eroon [10].

Kooreaktori toimi vakaasti ja luotettavasti koko testauksen ajan. Reaktori oli testauksessa viisi vuotta, pisimmillään sitä ajettiin jopa kuuden kuukauden jakso keskeytyksettä. Koe oli teknisesti hyvin onnistunut ja onnistuneen MSRE-hankkeen jälkeen ORNL pyrki jatkamaan tutkimusta hyötöreaktori MSBR:n pariin, mutta tutkimusta ei enää rahoitettu. Syyksi rahoituksen päättymiseen annettiin korroosio-ongelmat primääripiirin komponenteissa, kuten lämmönvaihtimissa. [13]

ORNL jatkoi vaatimatonta tutkimusta yhä 1980-luvun alkuun. Tämän jälkeen edistystä konseptin parissa ei tapahtunut yli 20 vuoteen lähes olemattoman rahoituksen vuoksi. Tutkimuksen päättymisestä johtuen MSRE-hankkeessa kehitellystä yhden fluidin konseptista tuli yleisin MSR-tyyppi, eikä muihin kehityssuuntiin ole juurikaan panostettu eikä niitä ole tutkittu ennen 2000-lukua [2]. Ydinvoimaan panostettiin toisenlaisten reaktori-tyyppien parissa, mutta sulasuolareaktorikonseptin kehittämistä ei nähty riittävän kannattavana. [8]

3.2 MSR-konseptin valinta neljännen sukupolven reaktori-tyypiksi

Uusi kiinnostus sulasuolareaktorikonseptia kohtaan heräsi 2000-luvun alkupuolella, kun Generation IV International Forum nimesi sulasuolareaktorin yhdeksi kuudesta neljännen sukupolven reaktori-tyypistä, jolla on potentiaalia viedä ydinvoiman kestävyyttä, turvallisuutta, vakautta ja luotettavuutta, taloudellista kilpailukykyä ja fyysistä suojausta seuraavalle kehityksen tasolle. Myös proliferaation, eli ydinasekelpoisen materiaalin hallitsemattoman leviämisen maailmalle hillitseminen on yksi tärkeistä Generation IV International Forumin kriteereistä reaktori-tyyppien valintaan. Valitut kuusi konseptia valittiin lähes sadan ehdotuksen joukosta ja alkuperäisen aikataulun mukaisesti niiden olisi tarkoitus olla kaupallisessa käytössä viimeistään vuonna 2030. [12] Tavoite on asetettu olettaen, että tutkimustyöhön investoidaan merkittävästi resursseja ja ainakin osa tutkimustyöstä tehtäisiin yksityisen sektorin ulkopuolisen tahon toimesta [14]. MSR-konsepti on valituista kuudesta tyypistä kunnianhimoisin ja GIF:n antamien aikataulujen saavuttaminen ajallaan koettiin erittäin haastavaksi jo vuonna 2008 [3].

Suurimmaksi haasteeksi neljännen sukupolven reaktorien kehityksessä nähtiin 2000-luvun alussa materiaalien pitkäaikainen kestävyys, stabiilius sekä säteilyn ja korkean lämpötilan aiheuttama materiaalien haurastuminen. Sulasuolareaktorien tapauksessa radioaktiivisen polttoainesuolaseoksen yhteensopivuus rakennemateriaalien kanssa vaati yhä tutkimusta ORNL:n projektien jälkeen. Muita yhteisiä haasteita GIF:n esittämässä reaktori-konsepteissa nähtiin polttoaineteknologian, polttoainekierron, mallintamisen ja simulaatioiden parissa. [3, 14] Yhtenäiset tutkimustavoitteet mahdollistivat sen, että eri

konseptien parissa tehtävät tutkimukset tukivat toisiaan ja olivat hyödyksi toistensa kehityksessä [14].

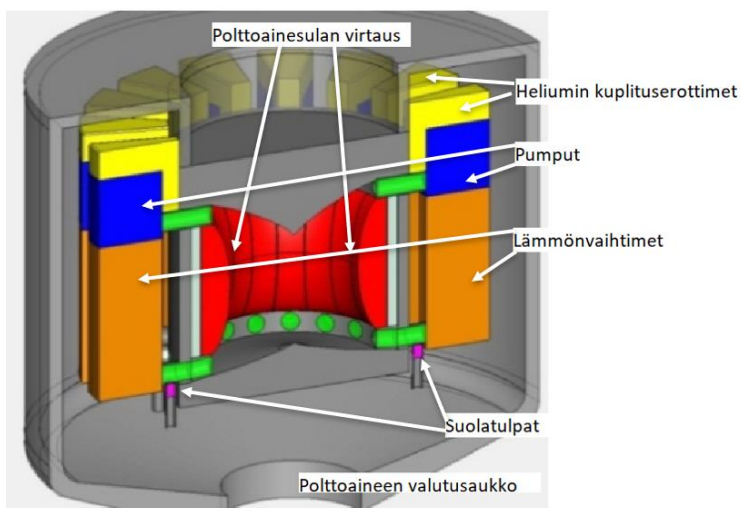
3.3 Tutkimuksen edistyminen 2000-luvun alusta vuoteen 2015

Sulasuolareaktorien kehityksen nopeuttamiseksi GIF päätti järjestää sähkövoimajärjestelmien laskenta -konferensseja (engl. Power System Computation Conference, PSCC), joihin kutsuttiin osallistujiksi Ranskan, Venäjän, Yhdysvaltojen ja Euroopan atomienergiayhdistys Euratomin (engl. European Atomic Energy Community) edustajia. PSCC tapaamisia järjestettiin vuonna 2010 kaksi kappaletta. Toisen konferenssin lopussa tilaisuus avattiin myös GIF:n sulasuolareaktoreiden kehityksen kannalta ulkopuolisille instituutioille. Vuonna 2012 järjestettiin uusi PSCC Kiinassa. Lisäksi Ranska ja Euratom allekirjoittivat vuonna 2010 yhteisymmärryssopimuksen, johon Yhdysvallat osallistui tarkkailijana. Venäjä liittyi tarkkailijaksi Ranskan ja Euratomin väliseen sopimukseen vuonna 2012. [12]

Vuosien varrella tutkimustyö edistyi ja seurauksena sulasuolareaktoreista syntyi useita eri konseptiehdotuksia. Alun perin sulasuolareaktoreita ajateltiin toimivaksi grafiittimoderoituna termisenä reaktorina, mutta jo vuodesta 2005 lähtien tutkimustyö on keskittynyt lähinnä ei-moderoituihin nopean neutronispektrin reaktoreihin. Kehitys- ja tutkimustyöstä voidaan löytää kolme pääsuuntaa; Yhdysvalloissa kehitteillä oleva fluoridisuolajäähdytteinen korkean lämpötilan reaktori, joka tunnetaan paremmin lyhenteellä FHR (engl. Fluoride-salt-cooled High-temperature Reactor), Kiinassa tutkittava toriumpolttoaineella toimiva suolareaktori (engl. Thorium Molten Salt Reactor nuclear energy system, TMSR), jossa tutkitaan sulasuolareaktorin esiasteena myös kiinteän suolan hyödyntämistä polttoaineena ja Euroopassa tutkittava nopean spektrin sulasuolareaktori, joka kykenee toimimaan joko hyötöreaktorina tai muuntamaan käytetyn ydinpolttoaineen aktinoideja. [10]

Vuonna 2011 alkoi kaksi toisiaan täydentävää tutkimusta: eurooppalainen projekti EVOL (engl. Evaluation and Viability of Liquid Fuel Fast Reactor Systems) eli nopeita neutroneita hyödyntävän nestemäisen polttoaineen reaktortyyppien toteuttamiskelpoisuutta arvioiva projekti ja venäläinen projekti MARS (engl. Minor Actinide Recycling in molten Salt), jossa tutkittiin ydinreaktiossa sivutuotteina syntyneiden aktinoidien uudelleenkäyttöä sulasuolassa. Molempien projektien tavoitteena oli saada aikaan peruskonsepti parhaalle mahdolliselle nopean spektrin sulasuolareaktorille (engl. Molten Salt Fast Reactor, MSFR) vuoteen 2012 mennessä. Projektien lopputuloksena muodostettiin kaksi käsitteellistä mallia, MARS:n lopputuloksena MOSART (engl. Molten Salt Actinide Recycler & Transmuter) ja EVOL:n lopputuloksena MSFR (engl. Molten Salt Fast Reactor). [12]

MSFR on 3 GW:n hyötöreaktori, jonka polttoaineena toimii litiumfluoridisulaan (77,5 mol%) liuotettu uraani(IV)fluoridin (2,5 mol%) ja torium(IV)fluoridin (20 mol%) seos. Yksinkertaistettu kuva MSFR:n reaktorin rakenteesta on esitetty kuvassa 3 [12]. Reaktorisydän on sylinteri, jonka halkaisija on yhtä suuri kuin sylinterin korkeus. Sydämessä ei ole hidastinta, eikä muitakaan rakenteellisia elementtejä, vaan se sisältää ainoastaan nestemäistä polttoainetta. Sitä ympäröi fertiilistä materiaalista tehty kerros, joka mahdollistaa yhdessä polttoaineen kanssa reaktorin hyötöominaisuudet. Tämä peitekerros sisältää suolaa, joka muistuttaa polttoaineseosta, mutta polttoaineseoksessa oleva uraani on korvattu toriumilla, jolloin toriumin mooliosuus on 22,5 mol%. Peitekerrosta puolestaan ympäröi boorikarbidista B_4C tehty kerros, jonka tarkoituksena on suojata lämmönvaihtimia sydäimestä poistuvilta neutroneilta. Sydämen ylä- ja alapuolella sijaitsevat neutronireflektoit, jotka edistävät reaktorin neutronitaloutta. Reaktorisydämen alla on tyhjennysjärjestelmä, joka mahdollistaa polttoainesuolaseoksen valuttamisen pois reaktorisydäimestä onnettomuustilanteessa. [11]



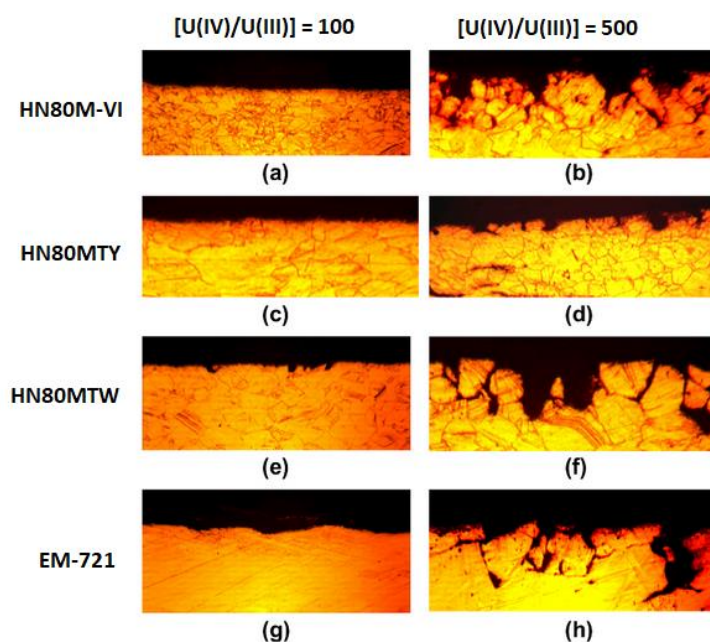
Kuva 3 MSFR:n reaktorin yksinkertaistettu rakenne [muokattu lähteestä 12]

MOSART on nopean neutronispektrin reaktorikonsepti, jonka polttoainekierto on hyvin joustava. MOSART kykenee käyttämään tehon tuottoon transuraanista jätettä (TRU), jota muodostuu kevytvesireaktorien (engl. Light Water Reactor, LWR) käytetystä polttoaineesta. MOSART-konsepti on 2,4 GW:n reaktori, jonka sydän on halkaisijaltaan 3,4 m ja korkeudeltaan 3,6 m sylinteri. Sydämessä on 0,2 m paksuinen grafiitista valmistettu neutronireflekto, joka sisältää sulasuolaa. Tärkeimpiä ja houkuttelevimpia MOSART-konseptin ominaisuuksia ovat muun muassa sen yksinkertainen homogeeninen malli, jossa ei ole kiinteää moderaattoria tai muita rakenteellisia osia, jotka kärsivät korkeasta säteilyn määrästä. Lisäksi proliferaation vastaisuus aktinoidien tehokkaan uudelleen käytön vuoksi ja todistettusti alle 1023 K lämpötilassa toimivat materiaalit ja järjestelmän

komponentit lisäävät konseptin houkuttelevuutta. Lisäksi ytimen toiminta on hyvin turvallista negatiivisen reaktiivisuuskertoimen vuoksi. [15]

GIF päivitti vuonna 2014 tutkimus- ja kehitystyön suurimpia haasteita sulasuolareaktoreiden kehityksen kannalta. Silloin suurimmaksi haasteeksi nousi edelleen materiaalien kehityksen tarve [12]. Sulasuola itsessään ei ole korroosioivaa, mutta kontaminoituaan veden tai hapen vaikutuksesta ja suolan säteilytyksen seurauksena suolaseoksesta tulee merkittävästi hapettavampi. Suolan muuttuessa hapettavammaksi se alkaa kuluttaa välimetalleja, joita löytyy polttoaine- ja jäähdytinainesuolan piirin rakennemateriaaleista. Kulumisen seurauksena rakennemateriaalia irtoaa ja sekoittuu suolaan vaikuttaen suolasuolan ominaisuuksiin polttoaineena ja jäähdyttimenä. [16] Nikkelipohjaisten seosten ominaisuuksien laboratoriotutkimukset ja korroosiotestit realistisissa olosuhteissa pitkällä altistusajalla koettiin hyväksi tutkimusmenetelmäksi [12].

Materiaalien kehitystarpeen lisäksi haasteiksi todettiin nestemäisen suolan hallinta ja mittaaminen. Suolan hapetuskyky täytyy pitää hallitusti tietyllä tasolla. Turvallisen toiminnan kannalta on tärkeää, että hapetuskykyä voidaan mitata jatkuvasti ja luotettavasti. Kuvassa 4 on selkeästi nähtävissä, kuinka merkittävän eron materiaalin kulumisessa hapetetun [U(IV)] ja pelkistyn [U(III)] uraanin suhde voi aiheuttaa [16]. Suuri hapetetun ja pelkistyn uraanin suhde polttoainesuolassa aiheuttaa selkeästi enemmän kulumista nikkelipohjaisessa seoksessa kuin pienempi suhde. Hapetuspotentiaalin lisäksi myös suolan fysiisiin ja kemiallisiin ominaisuuksien kokonaisvaltaisen ymmärtämisen saavuttaminen asetettiin tärkeäksi tutkimustavoitteeksi. [12]



Kuva 4 Erilaisten nikkelpohjaisten seosten pintakerros 250h altistuksen jälkeen polttoainesuolan kanssa 25 MPa ja 1013 K olosuhteissa. 50-kertainen suurennos. [muokattu lähteestä 16]

Edellä mainittujen kehityskohteiden lisäksi vuonna 2014 nostettiin esiin paikan päällä (engl. on-site) tapahtuva polttoaineen jälleenkäsittely. Jälleenkäsittelyn syvälinen tutkimus vaatii myös sulasuolojen kemiallisen käyttäytymisen tarkempaa ja syvällisempää tutkimista ja testaamista. Yksi sulasuolakonseptin merkittäviä etuja kevytvesireaktoreihin verrattessa on mahdollisuus toimia jatkuvasti, ilman polttoaineseisakkeja [10]. Jotta jatkuva toiminta olisi mahdollista, täytyy polttoainetta kyetä käsittelemään laitoksen ollessa toiminnassa. Mahdollisia metodeja oli jo vuoteen 2014 mennessä tutkittu, mutta niiden toimivuus myös teollisella tasolla vaati lisätutkimusta teknologisesta ja teknisestä näkökulmasta. [12]

Vuonna 2014 asetettiin myös pidemmän tähtäimen tavoitteita. Kehitys pidemmän tähtäimen tavoitteiden pariin ajateltiin tapahtuvan joko vuoden 2025 tai jopa vuoden 2030 jälkeen. Pidemmän tähtäimen tutkimustavoitteiksi asetettiin epäaktiivisen suolan testikierroksen rakentaminen, jotta sulasuolan suuren määrän hallintakykyä voidaan kehittää. Tästä seuraava vaihe olisi aktiivisen testireaktorin rakentaminen ja testaaminen ilman indusoidua fissiota. Ilman indusoidua fissiota toimivan testireaktorin tutkimusten jälkeen tarkoitus olisi siirtyä tutkimaan aktiivista testireaktoria, jossa tapahtuu myös indusoidu fissio. Tämä tutkimusvaihe olisi jo hyvin edistynyt ja lähellä konseptin kaupallista käyttöönottoa. [12]

3.4 Tutkimuksen nykytila ja tulevaisuuden haasteet

Sulasuolareaktorien kehitys on jatkunut ja syventävää tutkimusta eri konseptien pariin on tehty, mutta edistymisen nopeus on ollut hidasta. Todennäköisyys ensimmäisen sulasuolareaktorin valmistumiseen kaupalliseen käyttöön 2030-luvulla on nykyisellä kehitystahdilla hyvin pieni. Yksityisellä sektorilla kiinnostus sulasuolareaktoreihin on yhä korkealla, mutta julkisen rahoituksen vähäinen määrä on vaikuttanut kehityksen nopeuteen lamaannuttavasti. Julkisen rahoituksen vähyys on tärkeää ottaa huomioon arvioitaessa tutkimuksessa saavutettuja ja saavuttamattomaksi jääneitä virstanpylväitä. [17]

Suolan yhteensopivuutta reaktorien rakennemateriaalien kanssa tutkittiin testaamalla erilaisten nikkelpohjaisten seosten yhteensopivuutta litiumista, berylliumista, fluorista, uraanista ja toriumista tehtyjen suolaseosten kanssa. Testejä tehtiin luonnollista konvektiota hyödyntävässä kierrossa, jossa samalla mitattiin suolan hapetuspotentiaalia. Lisäksi tutkittiin plutonium-tri-fluoridin lisäyksen vaikutusta suolan ja rakennemateriaalin yhteensopivuuteen ja telluurin vaikutusta nikkeliseosten korroosioon. Tutkimuksissa saatiin toistetusti tulos, joka osoitti, että korroosio kaikille testatuille nikkeliseoksille on

verrannollista suolaseoksen hapetus-pelkistyspotentiaaliin ja lämpötilaan. Tehtyjen tutkimusten perusteella nikkelseoksella HN80MTY on parhaat mekaaniset ja korroosiota vastustavat ominaisuudet. HN80MTY-seoksen kemikaalinen koostumus on esitetty taulukossa 3 [18]. [17, 19, 20] Suolan korroosioisuuden todettiin olevan verrannollinen uraani(IV)fluoridin ja uraani(III)fluoridin suhteen neliöön. Korroosioisuutta kyetään rajoittamaan muokkaamalla uraanifluoridien suhdetta lisäämällä seokseen sopivaa pelkistintä. Pelkistimiseksi sopii esimerkiksi beryllium. [21]

Taulukko 3. HN80MTY-seoksen kemiallinen koostumus [muokattu lähteestä 18]

Aine	Massa- osuus (%)
Ni	Pohja
Mo	13,2
Cr	6,81
Fe	0,15
Mn	0,013
Ti	0,93
Nb	0,01
Al	1,12
Si	0,04
W	0,072
Co	0,003
Cu	0,02
C	0,025

Sulasuolojen käsittelyä tutkittiin muun muassa PYROSMANI-projektissa (engl. PYRO-chemical processes Study for Minor Actinides recycling in molten salt chlorides and fluorides)[17]. Polttoainesuolan jälleenkäsittelyssä seoksesta tulee poistaa aiemmin kierrossa syntyneitä sivutuotteita, jotka vaikuttavat suolan ominaisuuksiin negatiivisesti sekä lisätä suolaan fissiiliä tai fertiiliä materiaalia ydinreaktiossa hajonneen materiaalin tilalle [1]. PYROSMANI-projektissa tutkittiin cerium(III)fluoridien CeF_3 , plutonium(III)fluoridien PuF_3 ja uraani(IV)fluoridien UF_4 liukenemista LiF-NaF-KF ja $\text{LiF-ThF}_4\text{-UF}_4$ sulasuolo-seoksiin. PuF_3 :n ja UF_4 :n liukoisuutta LiF-NaF-KF seokseen on esitetty taulukossa 4. Taulukon arvoista huomataan selvästi, kuinka PuF_3 :n ja UF_4 :n yhteisliukoisuus sulasuolaan on huomattavasti heikompaa kuin PuF_3 :n ja UF_4 :n liuottaminen seokseen erikseen. Erikseen liukeneva määrä on moninkertainen verrattuna yhteisliukoisuuteen. Sama ilmiö havaittiin PuF_3 :n ja CeF_3 :n kanssa. PYROSMANI-projektin lopputuloksena kehitettiin heijastusspektrometriaan perustuva tekniikka, jolla voidaan mitata LiF-NaF-KF sulasuolasta epäpuhtauksien ja haluttujen tuotteiden konsentraatioita. [22]

Taulukko 4. *Plutonium(III)fluoridin ja uraani(IV)fluoridin liukoisuus LiF-NaF-KF seokseen [muokattu lähteestä 22]*

Lämpötila (K)	PuF ₃ liukoisuus erikseen (mol%)	UF ₄ liukoisuus erikseen (mol%)	PuF ₃ yhteisliukoisuus (mol%)	UF ₄ yhteisliukoisuus (mol%)
823	6,1 ± 0,6	15,3 ± 0,8	1,16 ± 0,14	1,75 ± 0,26
873	11,1 ± 1,1	24,6 ± 1,2	2,9 ± 0,3	3,5 ± 0,5
923	21,3 ± 2,1	34,8 ± 1,7	13,2 ± 1,6	11,0 ± 1,6
973	32,8 ± 3,3	44,7 ± 2,2	19,1 ± 2,3	17,3 ± 2,6
1023	Ei dataa	Ei dataa	21,0 ± 2,5	19,0 ± 2,8
1073	Ei dataa	Ei dataa	22,5 ± 2,7	20,0 ± 3,0

Tutkittaessa plutonium(III)fluoridin ja cerium(III)fluoridin liukoisuutta erilaisiin litiumin Li, natriumin Na, berylliumin Be ja toriumin fluoridiseoksiin huomattiin liukoisuuden olevan yhteydessä myös sulan lämpötilaan ja BeF₂, ZrF₄, UF₄ ja ThF₄:n konsentraatioihin. Mitä korkeampi sulan lämpötila on, sitä parempi on plutonium(III)fluoridin ja cerium(III)fluoridin liukoisuus, kun puolestaan suurempi BeF₂, ZrF₄, UF₄ tai ThF₄:n konsentraatio heikentää liukoisuutta. Venäjän atomireaktoritutkimuskeskuksen RIAR:n (Research Institute of Atomic Reactors) mukaan tutkimusten perusteella voidaan sanoa, että cerium(III)fluoridin lisäys LiF–ThF₄–UF₄–PuF₃ seokseen mahdollistaa aktinoidi(III)fluoridien tehokkaan erottamisen sulasuolasta. [23]

Edistysaskelia sulasuolareaktorien tutkimuksessa ja suunnittelussa tapahtui myös pitkän tähtäimen tavoitteiden parissa. Epäaktiivisen suolakierroksen testaamiseen suunniteltiin kaksi laitosta: SWATH-W ja SWATH-S [17]. SWATH-W laitoksessa kiertävänä nesteinä on vesi ja SWATH-S laitoksessa fluoridisuola. Näistä laitoksista saatavan datan avulla pyritään hankkimaan lisää tietoa suolojen lämmönsiirrosta ja ylipäätään säteilylämmönsiirrosta. Data tulee olemaan hyödyksi myös turvallisuuteen liittyvissä tutkimuksissa. [24]

Kiinassa on kehitteillä suolajähdytteinen kiinteää toriumpolttoainetta hyödyntävä reaktori TMSR (engl. Thorium Molten Salt Reactor). Vaikka kyseessä on kiinteää polttoainetta käyttävä konsepti, on TMSR:n parissa tehdyistä tutkimuksista hyötyä myös nesteistä polttoainetta hyödyntävien konseptien haasteiden ratkaisemiseen. Projektin puitteissa on muun muassa tutkittu suolan jälleenkäsittelyä jalokaasujen ja kuplituksen avulla. Lisäksi testilaitos TMSR-S70 on suunniteltu ja sen rakentaminen on jo käynnissä. TMSR-S70 laitoksessa ei ole indusoitua fissiota ja sen avulla on tarkoitus kerätä dataa lämpöhydrauliikasta. Myös indusoidun fission kanssa toimivan testilaitoksen TMSR-LF1 suunnittelu on aloitettu. [17]

Saavutettujen ja saavuttamattomien tavoitteiden valossa GIF on listannut sulasuolareaktorikonseptien tärkeimpiä kehityshaasteita seuraavalle kymmenelle vuodelle vuonna 2018 julkaistussa tilannekatsauksessa. Haasteita ovat muun muassa sopivien suolojen ja rakennusmateriaalien yhteensopivuuden tarkka määrittely, reaktorikäyttämisen mallinnuksen parantaminen, sulasuolareaktoreiden turvallisuusominaisuuksien selkeä osoittaminen ensin laboratoriotasolla ja sen jälkeen suuremmalla skaalalla sekä selkeän tutkimuskehityksen asettaminen. [17]

4. SULASUOLAREAKTORIEN TURVALLISUUS- EDUT VERRATTUNA KEVYTVESIREAKTOREI- HIN

Kiinnostus ydinvoimaa ja sen kehittämistä kohtaan on kasvanut viime vuosina maailmanlaajuisesti. Yksi syistä tähän on se, että ydinvoima on tunnistettu yhdeksi keinoksi taistella ilmaston lämpenemistä vastaan, sillä ydinvoimaa voidaan käyttää ilman jatkuvia hiilidioksidipäästöjä. Kioton puhtaan kehityksen mekanismin mukaisesti ydinvoimaa ei kuitenkaan hyväksytty proliferaation riskin, käytössä muodostuvan radioaktiivisen ydinjätteen ja yleisen turvallisuuden vuoksi. [25] Yksi sulasuolareaktorien suurimmista hyödyistä verrattuna perinteisiin reaktorityyppeihin on niiden turvallisuus monelta saralta, varsinkin edellä mainittujen epäkohtien osalta [25-28].

Ydinvoiman käytössä, kuten yleisesti teollisuudessakin, tavoitteena on aina häiriötön, taloudellinen ja turvallinen toiminta, mutta häiriöihin ja onnettomuuksiin tulee varautua. Ydin- ja säteilyturvallisuuslait ovat maailmalla, ja varsinkin Suomessa, hyvin tarkkaan määriteltyjä ja niiden noudattaminen on ympäristön kannalta elintärkeää [4]. Turvallisuuden varmistaminen on edellytys ydinenergian käytölle. Avainasioita ydinturvallisuudessa ovat reaktorin alasajomekanismi, reaktorin jäähdytysmekanismi ja radioaktiivisten aineiden eristäminen. Radioaktiivisten aineiden eristämällä tarkoitetaan lähinnä onnettomuustilanteessa tapahtuvaa aineiden karkaamisen estämistä laitoksen sisältä, mutta turvallisuuden kannalta on myös oleellista, ettei ydinenergian hyödyntäminen missään vaiheessa edistä ja helpota ydinaseiden leviämistä. [4, 26]

4.1 Laitostekninen turvallisuus

Kevytvesireaktoreiden laitostekninen turvallisuus on tällä hetkellä sulasuolareaktoreita edellä, sillä kevytvesireaktorit ovat jo kaupallisessa käytössä maailmanlaajuisesti. Kevytvesireaktoreiden turvallisuuden on jo todettu olevan sellaisella tasolla, että niiden käyttö on riittävän vakaata ja vähäriskistä. Kevyt- ja sulasuolareaktoreilla on myös yhteisiä turvallisuusmekanismeja, esimerkiksi molempien nopea alasajo suoritetaan säätösauvojen avulla [26]. Sulasuolareaktoreilla on kuitenkin useita uniikkeja turvallisuusetuja ja -menetelmiä verratessa perinteisiin LWR:hin, jotka potentiaalisesti parantavat ydinenergian kokonaisvaltaista turvallisuutta. [25, 26]

Sulasuolareaktoreissa polttoaine on jo valmiiksi nestemäisessä muodossa, joten polttoaineen tahaton sulaminen ei ole mahdollista. Kevytvesireaktoreissa kiinteä polttoaine voi

sulaa katastrofisin seurauksin, kuten vuonna 2011 Fukushima ydinvoimalaitoksella. Fukushima onnettomuudessa laitoksen ensimmäisessä, toisessa ja kolmannessa reaktoriyksikössä tapahtui ytimen sulamista. [29] Polttoaineen nestemäisen muodon etuna on myös sen mahdollinen evakuoiminen reaktorisydäimestä vikatilanteessa. Reaktorin alaosassa on tyhjennysjärjestelmä, jonka kautta painovoiman avulla polttoainesuola saadaan ilman suurempia työpanoksia ulos sydäimestä. Tärkeä osa tyhjennysjärjestelmää ovat suolatulpat reaktorin ytimen pohjalla. Lämpötilan noustessa liian suureksi suolatulppa sulaa ja painuu hydrostaattisen paineen ja painovoiman vaikutuksesta alaspäin [28]. Suolatulppa ja polttoainesuola tyhjentyvät alikriittiseen säiliöön, jossa suola jäähtyy itsestään turvallisesti. Tästä syystä sulasuolareaktoreissa hätäjähdytysveden syöttö on tarpeetonta. Kevytvesireaktoreissa vastaavan turvatoimen tilaa toimittaa hätäjähdytysveden ja/tai boorihapon ruiskutus systeemiin [26]. Boori hidastaa reaktiota ja pysäyttää reaktorin [10]. Sulasuolareaktoreilla on myös yksi ylimääräinen turvatoimi; reaktori on itsesäätöinen, sillä sula polttoaine laajenee lämmitessään, jolloin kohonneissa lämpötiloissa ydinreaktioiden lukumäärä vähenee. [10, 25, 26]

Sulasuolareaktorien primääripiirissä ei kulje lainkaan vettä tai höyryä ja reaktori ei operoi korkeissa paineissa, jolloin höyryräjähdysten mahdollisuutta ei ole. Polttoainesuolan kiehumislämpötila on huomattavasti korkeampi kuin sulasuolareaktorin operointilämpötila, eli primäärikierron paine ei voi kasvaa kiehumisen tai höyrystymisen johdosta. Näistä ominaisuuksista seuraa, että massiivisen ja kalliin painesuojan rakentaminen höyryräjähdysten varalle ei ole sulasuolareaktoreille tarpeen. Sulasuolareaktoreissa sisäpaine on 0.5 MPa:in luokkaa, kun puolestaan painevesireaktoreissa paine on noin 16 MPa:in ja kiehutusvesireaktoreissakin 7 MPa:in luokkaa. [25]

Kevytvesireaktoreissa on radioaktiivisen päästön estämiseksi viisi eri turvaustasoa: polttoainepelletti, polttoainesauvan suojakuori, painesäiliö ja putket, reaktorin suojakupi ja reaktorirakennus. Näistä tasoista kahta ensimmäistä ei löydy sulasuolareaktoreista polttoaineen olomuodon vuoksi. Onnettomuustilanteessa myös muiden radioaktiivisten aineiden leviämistodennäköisyys on sulasuolareaktoreissa pienempi kuin kevytvesireaktoreissa, sillä polttoainesuolaa käsitellään jatkuvasti ja siitä poistetaan suolan toiminnan kannalta haitallisia aineita, kuten jalokaasuja ja aktinoideja. [25-27]

4.2 Proliferaatio ja ydinjäte

Kuten luvun alussa mainittiin, ydinenergian käyttö ei saa edistää proliferaatiota, eli ydinaseiden leviämistä maailmalle. Proliferaatio ja radioaktiivinen jäte tulevat olemaan haasteina ydinenergian käytön suhteen niin kauan kuin uraania käytetään ydinpolttoaineena johtuen siitä, että ydinaseissa käytettyä plutoniumia voidaan tuottaa fertiilistä uraanista

ydinreaktorissa ja plutoniumin erottaminen käytetystä polttoaineesta on mahdollista. [25, 30]

Plutoniumia saadaan neutronikaappauksen avulla ^{238}U -isotoopista ydinreaktorissa, eli sitä voi syntyä kevytvesi- tai sulasuolareaktoreissa. Myös käytettäessä toriumista ja uraanista valmistettua polttoainesuolaa syntyy hieman plutoniumia, mutta määrä on pienempi kuin uraanipolttoainetta käytettäessä. Toriumin reaktiossa syntyy myös ^{233}U -isotooppia, jota on myös mahdollista käyttää ydinasemateriaalina. Toriumin reaktiossa on kuitenkin läsnä voimakasta gammasäteilyä, mikä vaikeuttaa ^{233}U :n käyttöön valjastamista. [25] Kevytvesi- ja sulasuolareaktorien proliferaation vastaisuudessa ei ole siis tällä hetkellä kovin suuria eroja [26].

Ydinjäte ja sen kertyminen on yksi suurimpia ydinvoiman vastaisuuden aiheuttajia maailmalla. Nykyisellään käytetyn kiinteän ydinpolttoaineen palautuminen takaisin alkuperäiselle radioaktiivisuuden tasolle luonnollisesti tulee viemään noin miljoona vuotta [25]. Tästä syystä on tärkeää, että ydinjätteen määrää sekä hajoamisaikaa pyritään minimoimaan. [1, 25, 31]

Kevytvesireaktoreissa käytetään kiinteää polttoainetta. Nykyisessä prosessissa kiinteän polttoaineen potentiaalista saadaan hyödynnettyä vain murto-osa. Jäljelle jäävästä käytämättömästä tai käyttökelvottomasta aineksesta tulee ydinjätettä. Sulasuolareaktorien avulla ydinjätteen määrää voidaan pienentää ja sen aktiivisena säilymisaikaa voidaan lyhentää merkittävästi. Ydinjätteen määrän pienentämisen mahdollistaa MSR:n joustava polttoainekierto, jonka avulla MSR voi käyttää polttoaineenaan transuraanista jätettä. Hyötöreaktorit pystyvät muuntamaan jätteestä itselleen polttoainetta, jolloin jäljelle jäävää jätettä on vähemmän ja se on vähemmän radioaktiivista. Kun kiinteän uraanipolttoaineen palautumiseen luonnollisen uraanin radioaktiivisuuden tasolle kuluu noin miljoona vuotta, vastaava aika toriumpolttoaineen aktiivisuuden palautumiseen luonnolliselle tasolle on vain muutama sata vuotta [25]. Sulasuolareaktorit ovat siis kevytvesireaktoreihin verrattuna huomattavasti turvallisempi vaihtoehto syntyvän ydinjätteen määrän ja laadun suhteen. [25, 31]

4.3 Kuljetus

Polttoaineeksi tarkoitetun uraanin kuljettaminen pitkiä matkoja on aina riskialtista. Uraanivarat ovat jakautuneet maailmalla hyvin epätasaisesti, jolloin uraania joudutaan kuljettamaan pitkiäkin matkoja rikastettavaksi ja polttoaineeksi. Hyödynnettäessä toriumkäyttöisiä sulasuolareaktoreita, lukuun ottamatta alkukäynnistykseen tarvittavaa polttoainetta, niille ei tarvitse kuljettaa yhtä suurta määrää polttoainetta, sillä toriumia esiintyy

enemmän luonnossa kuin uraania. Lisäksi jos reaktori toimii hyötöreaktorina, se tuottaa itse tarvitsemansa fissiilin polttoaineensa paikan päällä. [32]

Ydinpolttoaineen tai muiden radioaktiivisten aineiden ja komponenttien kuljetuksissa laitosalueiden ulkopuolella ei ole tapahtunut juurikaan merkittäviä onnettomuuksia. Osasyyn tähän on tarkat määräykset ja lait, jotka koskevat radioaktiivisten aineiden kuljetuksia. [33] Todellisuudessa kuljetusten tarpeen väheneminen tulisi siis tuskin vähentämään tapahtuvia onnettomuuksia merkittävällä tasolla, eli tästä näkökulmasta sulasuola- ja kevytvesireaktorit ovat jotakuinkin yhtä turvallisia.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Sulasuolareaktorien kehitys alkoi jo 1940-luvulla. Oak Ridgen kansallislaboratoriossa suoritettu sulasuolareaktorikoe todisti, että sähkön tuottaminen ydinreaktion avulla sulasuolapolttoainetta käyttäen on mahdollista. Onnistuneesta kokeesta huolimatta sulasuolareaktorikokeen jälkeen tutkimustyö keskittyi enemmän muihin reaktorikonsepteihin ja sulasuolareaktorien kehitys- ja tutkimustyö jäi hetkeksi taka-alalle. GIF:n raportin myötä kiinnostus kuitenkin elpyi ja 1900-luvulla tehtyihin tutkimuksiin nojaten aloitettiin tutkimus erilaisten sulasuolareaktorikonseptien ominaisuuksiin tavoitteena saada ensimmäinen sulasuolareaktori kaupalliseen käyttöön jo vuonna 2030.

Sulasuolareaktorien kehityksessä on tapahtunut suuria edistysaskelia 2000-luvulla. Varsinkin viimeisen kymmenen vuoden aikana tutkimus- ja kehitystyössä on edistytty yhä kasvavalla tahdilla. MSR-konseptin kehitys on kuitenkin jäänyt selvästi jälkeen alun perin asetetusta aikataulusta. Kaupalliseen sähköntuotantoon vuoteen 2030 mennessä sulasuolareaktoreita ei erittäin todennäköisesti tulla saamaan. Teknologian kypsyysaste ei ole vielä riittävällä tasolla. Sulasuolareaktoreista voi tulevaisuudessa tulla merkittävä tekijä ja ylivoimainen ratkaisu ydinvoima-alalla, mutta tarvittavaa tutkimus- ja kehitystyötä on vielä paljon tehtävänä muun muassa sulasuolojen kemiallisen käyttäytymisen ymmärtämiseksi, yhteensopivien materiaalien löytämiseksi ja ominaisuuksien varmistamiseksi teollisuuden vaatimassa mittakaavassa. Tavoitteesta jääminen ei ole yllättävää, sillä jo GIF:n asettaessa sulasuolareaktorit yhdeksi kuudesta neljännen sukupolven reaktorityypiksi tiedettiin, että sulasuolareaktori on valituista kaikista kunnianhimoisin ja vaati eniten tutkimusta.

Pisimmälle testilaitosten rakentamisessa ja muutenkin tutkimustyössä on edennyt kiinalainen TMSR-projekti. TMSR ei ole puhtaasti tässä kandidaatintyössä tarkasteltava sulasuolareaktori, sillä se ei toimi sulalla polttoaineella. TMSR:n parissa tehdyt tutkimukset ovat kuitenkin hyvä esiaste sulaa polttoainetta hyödyntävän reaktorin käyttöönottoon. Projektin parissa kartutettua tietämystä voidaan hyödyntää tehokkaasti samankaltaisten tutkimusteemojen vuoksi.

Suunnitellusta aikataulusta jäämiseen voidaan löytää ainakin yksi pääsyy: julkisen rahoituksen vähäisyys ja siitä seuraava intensiivinen kilpailu rahoituksesta. Tehdyssä aikatauluarviossa oletettiin, että julkiset tahot innostuisivat turvallisesta ja potentiaalisesti ydinpolttoaineen kierron sulkevasta konseptista enemmän. Näin ei kuitenkaan käynyt

odotetulla tasolla, vaan sulasuolareaktoreiden kehitys on pitkälti yksityisten rahoitusten varassa.

Sulasuolareaktorien nestemäinen polttoaine mahdollistaa monia turvallisuusominaisuuksia. Sula polttoaine on jo valmiiksi nestemäisessä olomuodossa, jolloin ytimen sulamista ei voi tapahtua, suola säätelee itse reaktiivisuuttaan laajetessaan lämpötilan nousumisen vaikutuksesta ja polttoaineen passiivinen evakuoiminen alikriittiseen säiliöön reaktorista onnettomuustilanteessa on mahdollista. Esimerkiksi näiden turvallisuusasioiden vuoksi sulasuolareaktorien voidaan sanoa olevan turvallisuudeltaan parempia kuin kevytvesireaktorien.

LÄHTEET

- [1] Křepel J, Hombourger B, Fiorina C, Mikityuk K, Rohde U, Kliem S, et al. Fuel cycle advantages and dynamics features of liquid fueled MSR. *Annals of Nuclear Energy* 2014;64:380–397.
- [2] LeBlanc D. Molten salt reactors: A new beginning for an old idea. *Nuclear Engineering and Design* 2010;240(6):1644–1656.
- [3] Abram T, Ion S. Generation-IV nuclear power: A review of the state of the science. *Energy Policy* 2008;36(12):4323–4330.
- [4] Eurasto T, Hyvärinen J, Järvinen M, Sandberg J, Sjöblom K. Ydinvoimailaitostekniikan perusteita. Toimittaja: Ydinturvallisuus Hämeenlinna: Säteilyturvakeskus; 2004.
- [5] International Atomic Energy Agency. Vienna, Organisation for Economic Cooperation and Development. Paris. Uranium 2014: resources, production and demand. 2014.
- [6] Uranium 2018: Resources, Production and Demand;2019 IIS 2400-S2. 2019.
- [7] Sun L, Niu Y, Hu C, Wang C, Dou Q, Li Q. Influence of molten salt composition on the fluorination of UF₄. *Journal of Fluorine Chemistry* 2019;218:99–104.
- [8] Rosenthal MW. An Account of Oak Ridge National Laboratory's Thirteen Research Reactors. 2009
- [9] Singh V, Lish MR, Chvála O, Upadhyaya BR. Dynamics and control of molten-salt breeder reactor. *Nuclear Engineering and Technology* 2017 Aug;49(5):887–895.
- [10] Serp J, Allibert M, Beneš O, Delpech S, Feynberg O, Ghetta V, et al. The molten salt reactor (MSR) in generation IV: Overview and perspectives. *Progress in Nuclear Energy* 2014 Nov;77:308–319.
- [11] Guerrieri C, Cammi A, Luzzi L. A preliminary approach to the MSFR control issues. *Annals of Nuclear Energy* 2014 Feb;64:472–484.
- [12] Nuclear Energy Agency. Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems. 2014.
- [13] Shaw M, An Evaluation of the Molten Salt Breeder Reactor. U.S. Atomic Energy Commission. 1972
- [14] U.S. Nuclear Energy Research Advisory Committee (NERAC), Generation IV International Forum (GIF). A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. 2002
- [15] Ignatiev V, Feynberg O, Gnidoi I, Merzlyakov A, Surenkov A, Uglov V, et al. Molten salt actinide recycler and transforming system without and with Th–U support: Fuel cycle flexibility and key material properties. *Annals of Nuclear Energy* 2014 Feb;64:408–420.

- [16] Guo S, Zhang J, Wu W, Zhou W. Corrosion in the molten fluoride and chloride salts and materials development for nuclear applications. *Progress in Materials Science* 2018 Aug;97(C):448–487
- [17] Nuclear Energy Agency. Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems. 2018.
- [18] Guo S, Zhang J, Wu W, Zhou W. Corrosion in the molten fluoride and chloride salts and materials development for nuclear applications. *Progress in Materials Science* 2018 Aug;97(C):448–487.
- [19] Ignatiev V, Surenkov A. 5.10 - Material Performance in Molten Salts. *Comprehensive Nuclear Materials*: Elsevier Ltd; 2016. p. 221–250.
- [20] Capelli E, Beneš O, Konings RJM. (2015) Thermodynamic assessment of the LiF–ThF₄–PuF₃–UF₄ system. *Journal of Nuclear Materials* 2015;462:43–53.
- [21] Surenkov A, Ignat'ev V, Abalin S, Konakov S, Uglov V. Corrosion Resistance and Mechanical Stability of Nickel Alloys in Molten-Salt Nuclear Reactors. *At Energy* 2018 May;124(1):43–49.
- [22] Ignatiev VV, Kormilitsyn MV, Lizin AA, Zagnitko AV, Konakov SA, Merzlyakov AV, et al. Key Experimental Results of the PYROSMANI Project. *Procedia Chemistry* 2016;21:417–424.
- [23] Lizin A, Tomilin S, Ignat'ev V, Osipenko A, Kormilitsyn M, Nezgovorov N. Joint solubility of PuF₃ and CeF₃ in ternary melts of lithium, thorium, and uranium fluorides. *Radiochemistry* 2015 Jan;57(1):36–42
- [24] Rubiolo PR, Retamales MT, Ghetta V, Giraud J. High temperature thermal hydraulics modeling of a molten salt: application to a molten salt fast reactor (MSFR). *ESAIM: Proceedings and Surveys* 2017;58:98–117.
- [25] Kamei T, Hakami S. Evaluation of implementation of thorium fuel cycle with LWR and MSR. *Progress in Nuclear Energy* 2011;53(7):820–824.
- [26] Elsheikh BM. Safety assessment of molten salt reactors in comparison with light water reactors. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences* 2013 Oct;6(2):63–70.
- [27] Toshinsky GI, Komlev OG, Mel'nikov KG. Nuclear power technologies at the stage of sustainable nuclear power development. *Progress in Nuclear Energy* 2011;53(7):782–787.
- [28] Tiberga M, Shafer D, Lathouwers D, Rohde M, Kloosterman JL. Preliminary investigation on the melting behavior of a freeze-valve for the Molten Salt Fast Reactor. *Annals of Nuclear Energy* 2019 Oct;132:544–554.
- [29] Koo Y, Yang Y, Song K. Radioactivity release from the Fukushima accident and its consequences: A review. *Progress in Nuclear Energy* 2014;74:61–70.
- [30] Gat U, Engel JR. Non-proliferation attributes of molten salt reactors. *Nuclear Engineering and Design* 2000;201(2):327–334.
- [31] Biss KH, Thomauske B. Shortening transmutation time by using the molten salt reactor. *Annals of Nuclear Energy* 2015;83:25–33.

- [32] Chollet P, Baylac-Domengetroy V. Optimizing Radioactive Material Transport: Transport Risk Management. Energy Procedia 2013;39:168–174.
- [33] World Nuclear Association. Transport of Radioactive Materials 2017 Saatavilla
www-muodossa: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/transport-of-nuclear-materials/transport-of-radioactive-materials.aspx> . Viitattu 17.1.2020